

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА: МЕТОДЫ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Базенков Н. И.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Рассмотрена задача моделирования локомоции человека, т.е. ходьбы, бега и других движений. Рассматриваются основные подходы и приложения. Управление движениями в нервной системе человека – это сложный и пока не полностью изученный процесс. При этом модели локомоции находят множество приложений в робототехнике и медицине, например, при разработке бионических протезов или экзоскелетов, диагностике заболеваний. В настоящее время существуют достаточно точные имитационные модели опорно-двигательного аппарата, т.е. скелета и мышц. Но для того чтобы с помощью такой модели воспроизвести движения человека, необходимо также воспроизвести процесс управления, реализованный нервной системой. Однако управление детальными скелетно-мышечными моделями – это очень сложная задача в силу большого количества степеней свободы и неоднозначности возможных управляющих воздействий. Мы рассмотрим управление на основе обучения с подкреплением и классических регуляторов. В целом методы создания точных моделей локомоции и настройки их параметров пока что недостаточно развиты для массового практического применения. Альтернативный подход состоит в аппроксимации наблюдаемой динамики походки универсальными статистическими моделями, такими как марковские цепи. В докладе также описано несколько приложений: прогнозирование состояния бионического протеза и диагностика двигательных патологий.

Ключевые слова: локомоция, нейроморфное управление, бионический протез, обучение с подкреплением, вычислительное моделирование, оптимальное управление.

1. Введение

Моделирование локомоции человека является сложной задачей по нескольким причинам. Во-первых, каждое движение порождается скоординированной активностью нескольких десятков мышц, чья активность, в свою очередь, управляется нервной системой. Во-вторых, существует множество вариантов выполнения одного и того же движения. Особенно эта вариативность

¹ Николай Ильич Базенков, к.т.н., с.н.с. (n.bazenkov@yandex.ru).

проявляется при наличии травм или ампутированных конечностей. Хотя биомеханика и физиология движений хорошо исследованы [1], их математические и вычислительные модели продолжают активно исследоваться.

В докладе приводится обзор современных методов моделирования походки человека и некоторые приложения.

2. Скелетно-мышечные модели

В настоящее время разработаны достаточно детальные модели опорно-двигательного аппарата человека [6, 15]. Они позволяют имитировать движение с учетом анатомии костей и суставов, активности основных групп мышц и сил реакции опоры.

Несмотря на то, что анатомия и физиология опорно-двигательного аппарата изучены хорошо, нет полного понимания того, как нейронные сети в спинном мозге управляют движениями. В [15] система управления походкой реализована как набор нескольких взаимосвязанных ПИД-регуляторов, каждый из которых реализует управление определенной группой мышц в ходе «своей» фазы движения. Планирование траектории и переключение видов движения осуществляется через команды верхнего уровня.

Скелетно-мышечные модели применяются для выдвигания и проверки гипотез о том, как организовано управление движением в нервной системе человека [3, 15], управления бионическими протезами [10], изучения отклонений при заболеваниях [7].

3. Обучение с подкреплением

Кроме применения в нейробиологических и медицинских исследованиях, скелетно-мышечные модели стали тестовым полигоном для методов искусственного интеллекта. С 2017 по 2019 годы прошло несколько соревнований [12–14], в которых искусственный агент должен был с нуля научиться ходить и бегать, т.е. управлять скелетно-мышечной моделью. Качество решения задачи в таких соревнованиях измеряется по заданным

целевым показателям: поддерживать скорость ходьбы или бега на заданном уровне, избегать падений и др.

Для обучения используются глубокие нейронные сети в сочетании с разнообразными методами обучения с подкреплением [9, 10]. Ускорение обучения достигается разными способами: модификацией функции вознаграждения (reward shaping), подбором значимых признаков (feature engineering), экспертными оценками (human-in-the-loop).

Один из способов получить качественное управление – используя экспериментальные данные, обучить сеть имитировать движение человека. Хотя явно задача получить правдоподобную имитацию в соревновании не ставится, и подавляющее большинство решений не используют нейробиологические модели и знания об организации нервной системы.

Такой подход оправдан, если цель соревнования – выявить эффективные универсальные методы обучения, применимые для других задач. Но если в качестве цели рассматривать создание моделей, полезных для медицинских исследований или для разработки бионических протезов, то универсальные обучающиеся архитектуры имеют существенные недостатки: большая вычислительная сложность, трудность интерпретации результатов, невозможность гарантировать хорошие результаты в новой ситуации, не встречающейся в обучающей среде. Существующие протезы, насколько можно судить по открытым источникам, не используют методы обучения с подкреплением [2], хотя исследовательские разработки ведутся [4].

4. Марковские модели

Марковские модели представляют динамическую систему как множество дискретных состояний с вероятностными переходами между ними. Вероятности переходов в следующее состояние определяются только текущим состоянием и не зависят от истории. Используются также полумарковские модели, в которых у каждого состояния появляется длительность, являющаяся, как правило, случайной величиной.

При описании динамической системы или набора данных марковской моделью пространство состояний разбивается на непересекающиеся области, каждая из которых соответствует одному дискретному состоянию. Таким образом, задача прогноза состояния динамической системы превращается в задачу оценки распределения вероятностей следующего состояния марковской модели.

Марковские модели широко используются в машинном обучении для задач структурирования данных, например, сегментации видео. В случае управления протезом первичными данными будут показания датчиков на протезе. В [11] процесс ходьбы моделируется полумарковским процессом на основе показаний датчиков давления на стопе и инерциальных датчиков, которые позволяют определить углы в коленном и тазобедренном суставе. Есть исследования по управлению протезом на основе марковских моделей [8]. К достоинствам этого подхода можно отнести его универсальность, вычислительную эффективность и сравнительную простоту реализации. Методика построения модели не изменится для человека с нетипичным паттерном походки, тогда как для построения точной биомеханической модели потребуется полноценное отдельное исследование.

Литература

1. БЕРНШТЕЙН Н.А. *Биомеханика и физиология движений*. – М.: «Институт практической психологии», 1997 – 608 с.
2. AZOCAR A.F., MOONEY L.M., DUVAL J.-F., SIMON A., HARGROVE L.J., ELLIOTT J. *Design and clinical implementation of an open-source bionic leg* // Nature Biomedical Engineering. – 2020. – Vol. 4, No. 10. – P. 941–953.
3. ACKERMANN M., VAN DEN BOGERT A.J. *Optimality principles for prediction of human gait* // J. of Biomechanics. – 2010. – Vol. 43. – P. 1055–1060.
4. EDWARDS A.L., HEBERT J.S., PILARSKI P.M. *Machine learning and unlearning to autonomously switch between the functions of a myoelectric arm* // Proc. 2016 6th IEEE Int.

- Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob). – 2016. – P. 514–521.
5. EILENBERG M.F., GEYER H., HERR H. *Control of a powered ankle-foot prosthesis based on a neuromuscular model* // IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2010. – Vol. 18, No. 2. – P.164–173.
 6. GEYER H., HERR H. *A muscle-reflex model that encodes principles of legged mechanics produces human walking dynamics and muscle activities* // IEEE Trans. on Neural systems and Rehabilitation Engineering. – 2010. – Vol. 18, No. 3. – P. 263–273.
 7. GOMES A.A., ACKERMANN M., FERREIRA J.P., ORSELLI M.I.V., SACCO I. C. *Muscle force distribution of the lower limbs during walking in diabetic individuals with and without polyneuropathy* // J. Neuroengineering and Rehabilitation. – 2017. – Vol. 14, No. 1. – P. 1–13.
 8. KAO J.C., NUYUJUKIAN P., RYU S.I., SHENOY K.V. *A high-performance neural prosthesis incorporating discrete state selection with hidden Markov models* // IEEE Trans. on Biomedical Engineering. – 2016. – Vol. 64, No. 4. – P. 935–945.
 9. KIDZIŃSKI Ł., ONG C., MOHANTY S.P., HICKS J. et al. *Learning to run challenge: Synthesizing physiologically accurate motion using deep reinforcement learning* // The NeurIPS'17 Competition. – 2018. – P. 101–120.
 10. KIDZIŃSKI Ł., ONG C., MOHANTY S.P., HICKS J. et al. *Artificial intelligence for prosthetics: Challenge solutions* // The NeurIPS'18 Competition. – 2020. – P. 69–128.
 11. MA H., LIAO W.H. *Human gait modeling and analysis using a semi-Markov process with ground reaction forces* // IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation engineering. – 2016. – Vol. 25, No. 6. – P. 597–607.
 12. NIPS 2017: Learning to Run. – URL: <https://www.crowdai.org/challenges/nips-2017-learning-to-run> (дата обращения: 15.08.2021).
 13. NeurIPS 2018: AI for Prosthetics Challenge. – URL: <https://www.crowdai.org/challenges/nips-2018-ai-for-prosthetics-challenge> (дата обращения: 15.08.2021).

14. NeurIPS 2019: Learn to Move - Walk Around. – URL: <https://www.aicrowd.com/challenges/neurips-2019-learn-to-move-walk-around> (дата обращения: 15.08.2021).
15. SONG S., GEYER H. *A neural circuitry that emphasizes spinal feedback generates diverse behaviours of human locomotion* // The Journal of physiology. 2015. – Vol. 593, No. 16. – P. 3493-3511.

MODELING OF HUMAN MOVEMENTS: METHODS AND PROBLEMS

Nikolay Bazenkov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, PhD, senior researcher (n.bazenkov@yandex.ru).

Abstract: We consider the problem of modeling human locomotion i.e., walking, running and other movements. The main approaches and applications are considered. Movement control in the human nervous system is a complex and not yet fully understood process. At the same time, models of locomotion find many applications in robotics and medicine. The examples are development of bionic prostheses or exoskeletons, diagnostics of diseases. Currently, there are quite accurate simulation models of the musculoskeletal system, that is the skeleton and muscles. But in order to reproduce human movements by such a model, it is also necessary to reproduce the control process implemented by the nervous system. However, the control of detailed skeletal-muscular models is a challenging task due to the large number of degrees of freedom and the ambiguity of possible control actions. We will consider control based on reinforcement learning classical methods. In general, the methods of creating accurate locomotion models and tuning their parameters are not yet sufficiently developed for large-scale practical application. An alternative approach is to approximate the observed gait dynamics by universal statistical models, such as Markov chains. The paper also describes several applications: predicting the state of a bionic prosthesis and diagnosing motor pathologies.

Keywords: locomotion, neuromorphic control, bionic prosthesis, reinforcement learning, computational modeling, optimal control.

УДК 519.7

ББК 22.18